

三相变压器等效瞬时电感的计算分析及 CT配置新方案

郑涛,刘万顺,谷君,杨青

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学),北京 102206)

摘要: 葛宝明等人以单相变压器模型为基础,提出一种利用等效瞬时电感变化特性判别变压器励磁涌流的算法,具有较好的识别效果。但对于三相变压器不同接线方式,尤其是 Y/ 接线方式下等效瞬时电感的计算问题,目前还未见相关文献研究,该文对此问题进行了深入的分析和探讨,研究结果对利用等效瞬时电感变化特性判别变压器励磁涌流算法在工程中的应用,具有一定的指导意义和参考价值。针对变压器侧绕组内部环流对等效瞬时电感计算结果影响大,而又难以通过线电流计算得到的特点,提出了一种新型的变压器差动保护 CT配置方案。该方案保证了等效瞬时电感的正确计算,同时又不会使差动保护存在保护死区。

关键词: 等效瞬时电感; 励磁涌流; 变压器差动保护; CT配置

中图分类号: TM77; TM41 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)16-0001-06

0 引言

正确区分励磁涌流和故障电流是变压器差动保护的一个难题,产生励磁涌流的本质原因是变压器励磁支路的非线性,在引入电压量后可以利用计算出的等效励磁电感大小和变化规律来识别励磁涌流和内部故障^[1-4]。文献[1]以单相变压器模型为基础,提出一种基于等效瞬时电感变化特性判别变压器励磁涌流的算法,具有较好的识别效果。但对于三相变压器而言,变压器绕组不同的接线方式,尤其是具有 Y/ 接线方式的变压器,在构成纵差保护时,由于变压器星型侧和角型侧的电流相位不一致,需要采取一定措施进行差流平衡调整。工程上常用的有“星变角”和“角变星”两种转角方式。不同的转角方式对等效瞬时电感计算结果有什么影响及影响程度如何?本文对上述问题进行了深入细致的分析研究,针对变压器角型侧绕组内部环流对等效瞬时电感计算结果影响大,而又难以通过线电流计算得到的特点,提出一种新型的变压器差动保护 CT配置方案,相较于文献[1]中采取的 CT配置方法,既保证了等效瞬时电感的准确计算,同时又不会使差动保护存在保护死区。

1 等效瞬时电感的概念及计算方法

图 1给出了分析上常用的单相变压器 T型等值电路,图中 L_1 、 r_1 、 i_1 、 u_1 分别表示原边绕组的漏感、

电阻、电流和端电压; L_2 、 r_2 、 i_2 、 u_2 分别表示从副边折算到原边的绕组漏感、电阻、电流和端电压; r_m 、 L_m 、 i_m 分别为励磁支路的等效电阻、励磁电感与励磁电流。

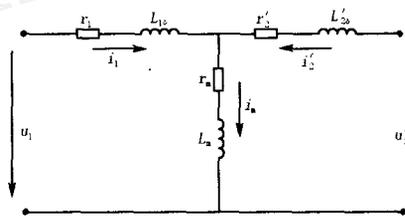


图 1 单相变压器 T型等值电路

Fig 1 Equivalent circuit of T mode for single phase transformer

根据 KVL 可列写原边绕组的回路方程如下:

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + r_m i_m + \frac{d}{dt} \quad (1)$$

式中: 表示原副边绕组的互感磁链,

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} = L_m \frac{di_m}{dt} \quad (2)$$

由式(2),瞬时励磁电感为 $L_m = d / di_m$,文献[1]中提出了等效瞬时电感的概念,即从原边绕组端口看进去的等效瞬时励磁电感。当变压器空载合闸发生涌流时,等效瞬时电感为瞬时励磁电感与原边漏电感之和,由于漏电感可以近似认为常数,如果从变化量的角度来观察,等效瞬时电感和瞬时励磁电感将具有同样的性质;当变压器内部发生匝间故障时等效瞬时电感由两部分构成,一部分为瞬时励磁电感与短路绕组漏感的并联,另一部分为原边绕

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50277012)

组的漏感,二者之和即为变压器内部发生匝间故障时的等效瞬时电感。在计及变压器绕组电阻,磁滞及涡流损耗,变压器发生励磁涌流与内部匝间故障时将具有如下的统一方程式^[1]:

$$u_1 = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} \quad (3)$$

式中, u_1 为变压器原边绕组的端口电压, r_k 为等效电阻, L_k 为等效瞬时电感, i_k 为变压器原副边绕组电流之差,即差流。为提高计算精度,在计算等效瞬时电感时考虑电阻的影响,消去等效电阻 r_k ,求得等效瞬时电感如下(为简单记,省略各物理量的下标)^[1]:

$$L_{(k)} = 2T_s \frac{u_{(k)} i_{(k+1)} - u_{(k+1)} i_{(k)}}{i_{(k)}^2 + i_{(k+1)}^2 - i_{(k-1)} i_{(k+1)} - i_{(k)} i_{(k+2)}} \quad (4)$$

式中小括号内的 k 表示第 k 个采样点的值, T_s 表示采样间隔。 i 也即 i_k , 为变压器原副边绕组电流之差。

2 Y/ 接线三相变压器等效瞬时电感的计算和分析

式(4)给出的等效瞬时电感计算公式,是以单相变压器为模型得到的,原则上可以推广到三相变压器的情况,但三相变压器接线复杂,特别是对具有 Y/ 接线方式的三相变压器而言,在构成变压器纵差保护时,由于变压器两侧电流相位不一致,必须采取一定措施来进行差流平衡调整,常用的有“星变角”和“角变星”两种转角方式。对于具有 Y/ 接线方式的三相变压器而言,侧 CT 的位置以及两种转角方式对等效瞬时电感计算的影响有必要做深入的分析研究。

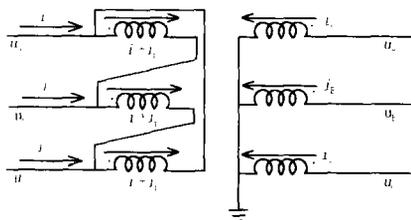


图 2 Y₀/D-1 接线三相变压器模型

Fig 2 Y₀/D-1 connected three-phase transformer model

以图 2 所示的采用 Y₀/D-1 接线方式的三相双绕组变压器为例进行说明,图中 i_k 为侧绕组内部环流, i_a 、 i_b 、 i_c 为侧三相线电流,变压器两侧电流的正方向,如图中箭头所示。

以变压器从侧空载合闸为例,用 EMTP 仿真

验证式(4)计算等效瞬时电感的结果。为简单起见,不计磁滞回线的影响,并忽略铁芯损耗,铁芯磁化曲线采用双折线来描述,如图 3 所示。图中的 S 点表示变压器稳态运行对应的工作点。

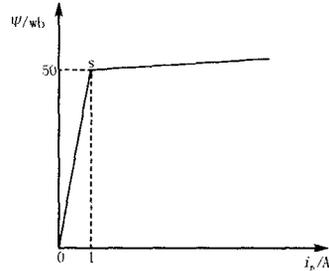


图 3 简化的铁芯磁化曲线

Fig 3 The simplified excitation curve

2.1 变压器侧 CT 接于绕组内部

变压器侧 CT 接于绕组内部,即可以直接测得侧绕组上的电流,差动电流为原副边绕组电流之差,电压采用侧线电压,当变压器从侧空载合闸,以 a 相绕组为例,仿真计算结果如图 4 所示。

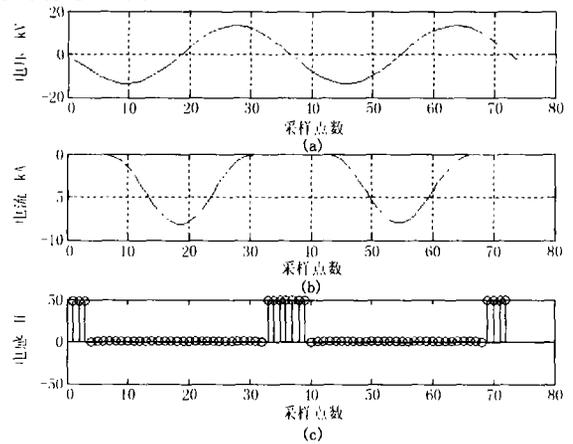


图 4 变压器侧 CT 接于绕组内部时仿真计算结果

Fig 4 Simulation result when CT connected in the winding of delta side of transformer

图 4(a)给出了变压器侧的线电压 u_{ab} 的波形,图 4(b)给出了变压器侧 A 相绕组电流(即 $i_a + i_b$)的波形,图 4(c)给出了采用式(4)计算等效瞬时电感的结果。由图可见:在变压器从侧空载合闸并将 CT 接于侧绕组内部的情况下,采用式(4)能够准确计算出等效瞬时电感的大小,并能够准确地反映出涌流情况下励磁电感的变化情况,与理论分析结果相一致。

2.2 变压器侧 CT 接于绕组外部(“角变星”方式)

变压器 侧 CT接于绕组外侧,即只能测量到侧的线电流,为得到式(4)计算所必需的差动电流,采用“角变星”的转角方式对差流进行平衡调整,对于图2所示的 $Y_0/D-1$ 接线形式,转角变换公式如式(5)和式(6)所示(简单记,假设变压器原副边绕组匝数比为1:1)。

$$\begin{cases} i_a = (i_a - i_b) / 3 \\ i_b = (i_b - i_c) / 3 \\ i_c = (i_c - i_a) / 3 \\ i_0 = (i_a + i_b + i_c) / 3 \\ i_{da} = i_a + (i_b - i_c) \\ i_{db} = i_b + (i_c - i_a) \\ i_{dc} = i_c + (i_a - i_b) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{da} = i_a + (i_b - i_c) \\ i_{db} = i_b + (i_c - i_a) \\ i_{dc} = i_c + (i_a - i_b) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)即为所需的三相差动电流,电压采用变压器侧线电压,当变压器从侧空载合闸,以a相绕组为例,仿真计算结果如图5所示。

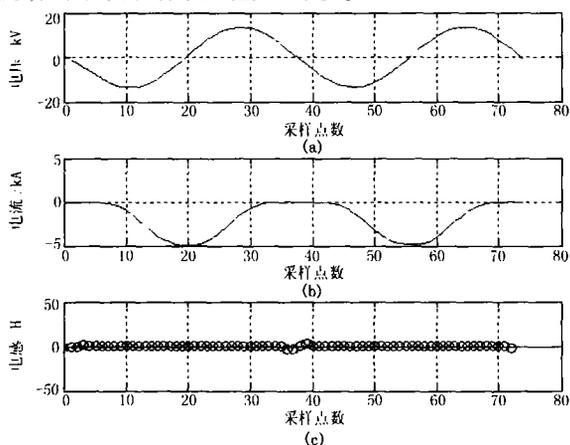


图5 变压器侧CT接于绕组外部并采用“角变星”方式下的仿真计算结果

Fig 4 Simulation result when CT connected in the outside of delta side of transformer and "delta-to-wye" transform mode adopted

图5(a)给出了变压器侧线电压 u_{ab} 的波形,图5(b)给出了采用“角变星”方式的变压器a相差动电流(即 i_{da})波形,图5(c)给出了应用式(4)计算等效瞬时电感的结果。与图4(c)相对比,显然在此种情况下,等效瞬时电感计算结果非常不准确,没有反映出励磁涌流情况下励磁电感应有的变化规律。分析一下出现这种现象的原因:采用“角变星”的转角方式,a相差动电流为 $i_{da} = i_a + (i_b - i_c)$,考虑到变压器从侧空载合闸,Y侧线电流为零,所以a相的实际差动电流为 $i_{da} = i_a = (i_a - i_b) / 3$,电压采用侧线电压 u_{ab} ,与变压器侧CT接于绕组内部的情况相比,不同之处在于所用差动电流的大小不同。

由于侧CT接于绕组外侧,通过侧线电流只能计算得到不含环流量 i_0 的近似绕组电流,因而导致计算结果不正确。

2.3 变压器侧CT接于绕组外部(“星变角”方式)

变压器侧CT接于绕组外侧,差动电流采用“星变角”的转角方式,对于图2所示的 $Y_0/D-1$ 接线组别,转换公式如式(7)和式(8)所示(简单记,假设变压器原副边绕组匝数比为1:1)。

$$\begin{cases} i_{ae} = i_a - i_c \\ i_{be} = i_b - i_a \\ i_{ce} = i_c - i_b \\ i_{da} = i_a + i_{ae} \\ i_{db} = i_b + i_{be} \\ i_{dc} = i_c + i_{ce} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_{da} = i_a + i_{ae} \\ i_{db} = i_b + i_{be} \\ i_{dc} = i_c + i_{ce} \end{cases} \quad (8)$$

电压仍然采用侧线电压,当变压器从侧空载合闸,以a相绕组为例,仿真计算结果如图6所示。

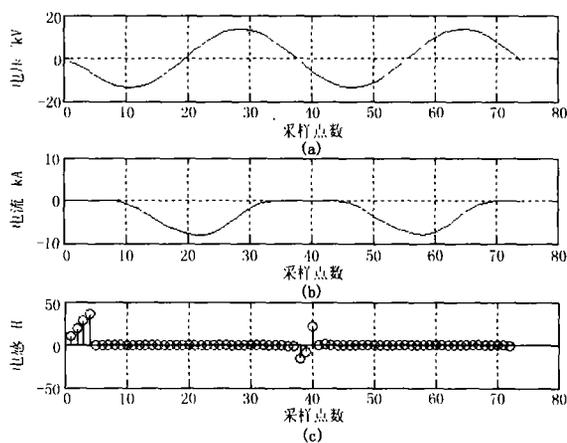


图6 变压器侧CT接于绕组外部并采用“星变角”方式下的仿真计算结果

Fig 6 Simulation result when CT connected in the outside of delta side of transformer and "wye-to-delta" transform mode adopted

图6(a)给出了变压器侧的线电压 u_{ab} 的波形,图6(b)给出了采用“星变角”方式的变压器a相差动电流(即 i_{da})波形,图6(c)给出了应用式(4)计算等效瞬时电感的结果。与图4(c)相对比,在此种情况下,等效瞬时电感的计算结果也不正确,也没有正确反映出励磁涌流情况下励磁电感应有的变化规律。分析一下原因:采用“星变角”的转角方式,a相差动电流为 $i_{da} = i_a + i_{ae}$,考虑到变压器从侧空载合闸,Y侧线电流为零,所以a相的实际差动电流就是侧线电流 i_a ,而电压采用侧线电压 u_{ab} ,采用

这两个量与图 1 所示单相变压器的理论分析模型不一致,其计算结果的物理意义不明确,因而不能正确反映出励磁涌流情况下励磁电感应有的变化规律。

2.4 拟消除变压器 侧绕组内部环流方案及讨论

对于图 2 所示 $Y_0/D-1$ 接线的双绕组变压器,当从变压器 侧空载合闸时,忽略铁芯损耗,并计及式 (2),列写 侧回路方程如下:

$$\begin{cases} u_{ab} = r_a(i_a + i_b) + l_a \frac{d(i_a + i_b)}{dt} + L_{ma} \frac{d(i_a + i_b)}{dt} \\ u_{bc} = r_b(i_b + i_c) + l_b \frac{d(i_b + i_c)}{dt} + L_{mb} \frac{d(i_b + i_c)}{dt} \\ u_{ca} = r_c(i_c + i_a) + l_c \frac{d(i_c + i_a)}{dt} + L_{mc} \frac{d(i_c + i_a)}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

其中: r_a, r_b, r_c 表示各相绕组电阻, l_a, l_b, l_c 表示各相绕组漏感, L_{ma}, L_{mb}, L_{mc} 分别表示各相的励磁电感,可以近似认为 $r_a = r_b = r_c = r, l_a = l_b = l_c = l$ 若进一步假设 $L_{ma} = L_{mb} = L_{mc} = L_m$,则由式 (9) 两两相减,消除环流 i_b 可得:

$$\begin{cases} u_{ab} - u_{ca} = r(i_a - i_c) + l \frac{d(i_a - i_c)}{dt} + L_m \frac{d(i_a - i_c)}{dt} = \\ r i_{a'} + l \frac{d i_{a'}}{dt} + L_m \frac{d i_{a'}}{dt} \\ u_{bc} - u_{ab} = r(i_b - i_a) + l \frac{d(i_b - i_a)}{dt} + L_m \frac{d(i_b - i_a)}{dt} = \\ r i_{b'} + l \frac{d i_{b'}}{dt} + L_m \frac{d i_{b'}}{dt} \\ u_{ca} - u_{bc} = r(i_c - i_b) + l \frac{d(i_c - i_b)}{dt} + L_m \frac{d(i_c - i_b)}{dt} = \\ r i_{c'} + l \frac{d i_{c'}}{dt} + L_m \frac{d i_{c'}}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (10),以 a 相为例,对于 $Y_0/D-1$ 接线方式的变压器,当从 侧空载合闸时,电流量选用侧线电流 i_a ,而电压量采用 侧线电压之差 $u_{ab} - u_{ca}$,再应用式 (4) 似乎可以准确地计算出等效励磁电感,图 7 给出了采用上述方法的仿真计算结果。

从图 7 的仿真计算结果看,采用这种方法似乎在一定程度上反映了涌流情况下励磁电感的变化规律,其效果仅次于变压器 侧 CT 接于绕组内部的方案(图 4),但仔细分析不难发现该方法存在明显的漏洞,因为由式 (9) 得到式 (10) 的一个重要前提条件是假设 $L_{ma} = L_{mb} = L_{mc} = L_m$,而该假设是否正确合理还值得商榷,众所周知,励磁涌流的产生是一个非常复杂的过程,即使变压器各相绕组的励磁特性

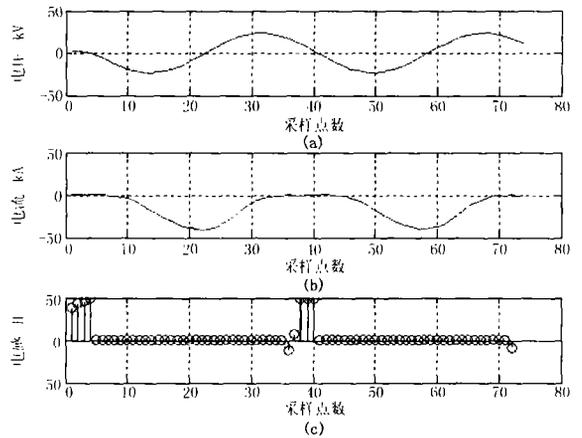


图 7 拟消除变压器 侧绕组内部环流方式下的仿真计算结果

Fig 7 Simulation result when the method that seems to clear the circulating current in delta side is adopted

完全一致,励磁涌流还受到诸如合闸初相角、铁芯剩磁的大小和方向等诸多因素的影响。尤其是对于三相变压器,三相电压分别相差 120° ;三相基波磁链也互差 120° ;由于磁链不能突变,从而使得三相磁链必然具有不同的变化过程,再考虑到铁芯剩磁大小和方向等因素的影响,三相绕组的励磁电感不可能在每一瞬间都具有相同的数值,有时甚至会相差很大,因此由式 (9) 得到式 (10) 的前提条件是不成立的,不能依据式 (10) 来求等效励磁电感。

2.5 对变压器 侧绕组内部环流的分析及讨论

由前面的分析可以看出,对于具有 接线方式的三相变压器,当变压器从 侧空载合闸时,由侧线电流无法正确计算出励磁电感,问题的关键在于 侧绕组内部存在环流的影响,那么是否有什么方法能够对 侧绕组内部的环流进行补偿呢? 这要对变压器 侧绕组内部环流进行仔细分析,图 8

(a) 给出了 侧 CT 接于绕组内部时测得的绕组电流;图 8 (b) 给出了由 侧线电流按照式 (5) 计算得到的近似绕组电流(不含环流分量);图 8 (c) 是由图 8 (a) 减去图 8 (b) 得到的,也即 侧绕组的环流分量;图 8 (d) 是对图 8 (c) 做傅里叶变换后的结果。由图 8 (c) 可以看出,当变压器从 侧空载合闸时, 侧绕组内具有数值较大的环流分量,如果忽略它的影响,势必会影响到励磁电感的正确计算,这也是不能采用“角变星”方式来计算励磁电感的原因。通过对环流分量进行傅里叶分析发现,环流主要包含直流、基波、二次谐波和三次谐波等分量,进一步实验发现不同的合闸初相角,环流内的谐波分量也

会有较大变化。为什么会出现这种现象?而不是传统意义上的环流主要是三次谐波电流?笔者分析认为这主要是由于合闸初始时刻三相磁通中的衰减非周期分量具有不同的初始值,从而造成三相磁通的不对称,另外又受到变压器铁芯饱和的影响而最终导致在侧绕组内部产生含有丰富谐波分量的环流。

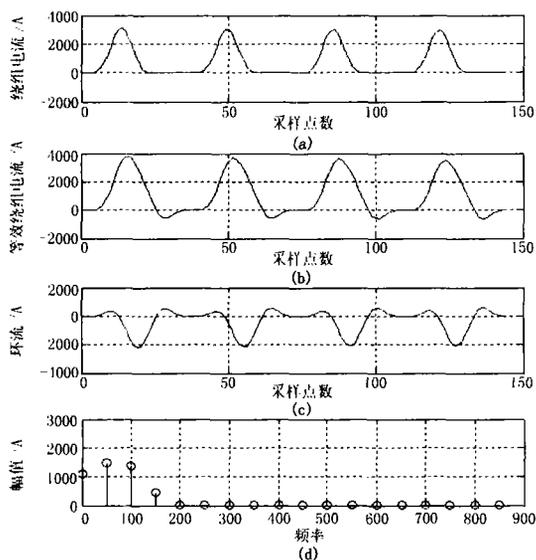


图 8 对变压器侧绕组内部环流分量的仿真分析
Fig 8 Simulation and analysis on the circulating current in delta side of transformer

3 Y/ 接线变压器差动保护 CT配置新方案

根据前述分析,当变压器从侧空载合闸时,侧绕组内部环流构成成分复杂,且受到诸多因素的影响,具有不确定性,采取对其进行补偿的方法有很大难度。文献[1]在对Y/接线方式变压器求取等效瞬时电感时,提出的方案是将变压器侧CT装于每相绕组内部,可以直接测得绕组上的电流,避免了环流对励磁电感计算结果的影响。侧CT接于绕组内部的变压器差动保护方案如图9所示,采用该接法的变压器差动保护能保护匝间短路和相间故障(故障点在CT内侧),但对于变压器侧CT外侧的相间故障,该差动保护无法反映,存在保护死区,这也是该方案的一个严重缺陷。如何既能准确地计算出励磁电感,使其不受侧绕组内部环流的影响,同时又不会使变压器差动保护存在保护死区?为实现这个目的,针对具有Y/接线方式的变压器,笔者设计了一种新的变压器差动保护CT配置

方案,以Y0/D-1接线为例,构成如图10所示。

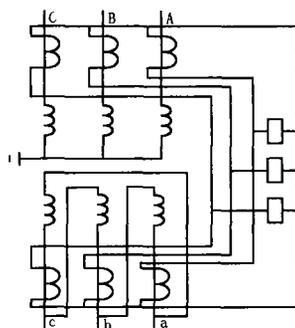


图 9 侧CT接于绕组内部时的变压器差动保护接线
Fig 9 The configuration of transformer differential protection when CT connected in the winding of delta side

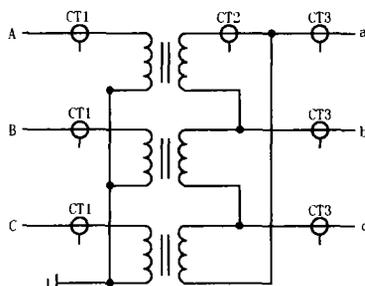


图 10 新型变压器差动保护 CT配置方案
Fig 10 A novel CT configuration of transformer differential protection

在图10中,变压器差动保护接线由CT1和CT3构成,与传统差动保护CT配置方式一致,差别在于仅需要在变压器侧多接入一相的绕组CT,如图10中CT2所示。CT2是用来测量变压器侧的某相绕组电流,然后与侧CT3所测得的各线电流,利用KCL定律可以求得侧各相的绕组电流。以图10所示为例,由侧a相绕组电流 i_{a2} 和a相线电流 i_{a3} 可以得到侧c相的绕组电流 i_{c2} (电流正方向规定为指向变压器内部),如式(11)所示;由侧a相绕组电流 i_{a2} 和侧b相的线电流 i_{b3} ,可以得到侧b相的绕组电流 i_{b2} ,如式(12)所示。

$$i_{c2} = i_{a2} - i_{a3} \quad (11)$$

$$i_{b2} = i_{a2} + i_{b3} \quad (12)$$

式中: i_{a3}, i_{b3}, i_{c3} 分别表示由CT3测量到的变压器侧三相的线电流, i_{a2}, i_{b2}, i_{c2} 分别表示由CT2测量到的侧三相的绕组电流。采用图10的接线方式,一方面不会使变压器差动保护存在死区,另一方面由于CT2的存在,可以很容易地通过变压器侧的线电流求得侧各相绕组电流,解决了侧绕组电流由于环流分量影响而不易准确求取的难题。在准

确地求得变压器 侧各相绕组电流的基础上,应用式(4)就能够正确地计算出变压器各相绕组的等效瞬时电感。需要说明的是:该方案与文献[1]采取的方案均只适用于三相分体式变压器,对于三相一体式变压器,由于 侧绕组内无法接入CT,两种方案都不适用。对于三相一体式变压器如何利用等效瞬时电感变化规律识别励磁涌流还有待研究探讨。

4 结论

本文在文献[1]提出的基于等效瞬时电感变化特性判别变压器励磁涌流算法的基础上,深入分析和探讨了具有Y/接线方式的三相变压器等效瞬时电感的计算问题。针对变压器 侧绕组内部环流对等效瞬时电感计算结果影响大,而又难以通过线电流计算得到的特点,提出了一种新型的变压器差动保护CT配置方案,该方案适用于三相分体式变压器。采用该方案既保证了等效瞬时电感的正确计算,同时又不会使变压器差动保护存在保护死区。

参考文献:

- [1] 葛宝明,于学海,王祥珩,等.基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J].电力系统自动化,2004,28(7):44-48
GE Bao-ming, YU Xue-hai, WANG Xiang-heng, et al A Novel Equivalent Instantaneous Inductance Based Algorithm Used to Distinguish Inrush Currents for Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44-48
- [2] 韩正庆,高仕斌,李群湛.基于变压器模型的新型变压

器保护原理和判据[J].电网技术,2005,29(5):67-71.
HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin, LI Qun-zhan A Novel Transformer Model Based Protective Principle for Transformer and Its Criteria[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 67-71.

- [3] 宗洪良,金华烽,朱振飞,等.基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J].中国电机工程学报,2001,21(7):91-94
ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, ZHU Zhen-fei, et al Transformer Inrush Detected by the Variation of Magnetizing Impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94
- [4] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2002
WANG Wei-jian Relay Protection of Main Electric Equipment Their Principle and Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002
- [5] 汤蕴,史乃,沈文豹.电机理论与运行(上册)[M].北京:水利电力出版社,1983
TANG Yun-qiu, SHI Nai, SHEN Wen-bao Mechanical Theory and Operation, Part I[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1983

收稿日期: 2006-02-21; 修回日期: 2006-02-27

作者简介:

郑涛(1975-),男,博士,讲师,主要研究方向为电力变压器保护与仿真等;E-mail: zhentao_sf@126.com

刘万顺(1941-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统仿真和微机保护等;

谷君(1982-),女,硕士研究生,研究方向为微机变压器保护。

Analysis of the calculation of equivalent instantaneous inductance in three-phase transformer and a new CT's configuration

ZHENG Tao, LU Wan-shun, GU Jun, YANG Qing

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An algorithm based on the variable characteristic of the equivalent instantaneous inductance to distinguish inrush currents from fault currents in transformer protection was put forward by GE Bao-ming et al, which is validated by transformer with current transformer (CT) connected in each winding. Current transformer is hard to be connected in transformer winding, which could affect the calculation of the equivalent instantaneous inductance in three phase transformer, especially that connected in wye-delta mode. This paper analyses the calculation of the equivalent instantaneous inductance in wye-delta connected three phase transformer, which has directive meaning and reference value to the research on the discrimination between inrush currents and fault currents based on the equivalent instantaneous inductance. The circulating current in the winding of delta side of transformer is hard to be calculated from line currents and affects the accurate calculation of the equivalent instantaneous inductance greatly. In that case, a novel configuration of current transformer (CT) in transformer differential protection is proposed, which ensures the accurate calculation of the equivalent instantaneous inductance as well as no dead zone in transformer differential protection.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277012).

Key words: equivalent instantaneous inductance; inrush currents; transformer differential protection; CT configuration